

纳米天线增强光波透过金属薄膜上亚波长小孔的模拟研究

陈跃刚 刘广群

(贵州大学物理系, 贵州 贵阳 550025)

摘要 亚波长金属结构的光学性质已成为光学研究的热点之一。应用三维时域有限差分(3D-FDTD)法模拟研究了利用三维金属纳米天线实现的金属薄膜上亚波长狭缝的光波强透射。分别在金属膜前后放置金属天线,计算光波透过金属薄膜上亚波长狭缝的透射率。通过改变小孔和天线的相对位置,发现当天线和小孔共振模的阶数同为二阶和三阶时,相位匹配,能相互耦合,形成两个强透射峰。当天线放置在狭缝前方和后方,天线共振可以将能量耦合进入和耦合出小孔,都能实现强透射。

关键词 纳米天线;金属亚波长结构;表面等离子体;金属薄膜

中图分类号 O431.1;O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.091601

Simulation Investigation of Optical Wave Enhanced Transmission Through a Subwavelength Hole on Metal Film by Using Nano-Antenna

Chen Yuegang Liu Guangqun

(Department of Physics, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract The optical properties of the subwavelength metal structure have become a hotspot of optical research. The influence of metal nano-antenna on optical wave transmission through the subwavelength hole on metal film is investigated by applying the three-dimensional finite-difference time-domain (3D FDTD) method. Nano-antenna is laid in front of and behind a metal film with a hole, respectively. The zeroth-order transmittances are obtained. It is found that the second-order and third-order enhanced transmission is realized under the phase matching condition when the orders of resonances mode of antenna and hole are the same. Energy can be coupled into the hole to enhance the near fields through antenna resonance when the antenna is laid in front of the hole, while coupled out of the hole through antenna resonance when the antenna is laid behind the hole.

Key words nano-antenna; metallic subwavelength structures; surface plasma; metal film

OCIS codes 160.3900; 310.6628; 240.6680; 240.7040

1 引言

基于小孔衍射理论^[1],1998年,Ebbesen等^[2]研究发现金属薄膜上亚波长孔阵列结构的强透射现象,认为表面等离子体共振导致了强透射。此后,亚波长纳米结构的光学性质成为研究的热点,亚波长结构器件的设计种类越来越多^[3~5]。2001年,Takakura^[6]采用波导模理论分析了金属膜上亚波长单缝的透射光场,给出了单缝透射率的理论公式,认为亚波长单缝的透射异常是由于单缝内的类法布里-珀罗(F-P)共振现象造成的。随后,人们研究了在金属板上的狭缝和圆孔周围刻蚀凹槽对光透射率的影响,发现加入周期环形凹槽使透射率有较大的提高^[7~10],认为凹槽中的表面等离子体共振增强了小孔和狭缝附近的近场,导致了强透

收稿日期: 2012-05-24; 收到修改稿日期: 2012-05-28; 网络出版日期: 2012-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(11104041)资助课题。

作者简介: 陈跃刚(1978—),男,博士,副教授,主要从事亚波长金属阵列结构光传输、光子晶体等方面的研究。

E-mail: yg_chenyg@sina.com.cn

射现象。金属亚波长结构中表面等离子体研究有重要的应用前景。近年来,人们提出利用亚波长集成光路来控制表面等离子体的传输^[11],很多控制表面等离子体的波导结构被提出,如金属-介质-金属结构波导^[12,13]、“V”形结构波导^[14,15]、双线结构波导^[16,17]等。

纳米光学天线是一种新颖的元件,它利用表面等离子体共振增强近场。2003年,Crozier等^[18]研究了一种光学天线结构,共振波长位于可见光波段,实现了局域场增强。2008年,Alu等^[19~21]利用微波天线的概念来分析纳米光学天线,将光学天线等效成射频电路,分析了金属纳米天线结构对共振频率的影响。2009年,Cui等^[22]把两块平行金属板间的间隙视为二维腔天线。当腔天线发生共振时,金属膜上的亚波长狭缝光波的透射率增加2~3倍。

本文通过在金属薄膜前后分别放置三维金属天线,研究光波透过金属薄膜上亚波长狭缝的透射率,利用金属纳米天线共振实现狭缝的强透射。通过自己编写的三维时域有限差分(3D-FDTD)程序对其进行了模拟计算。分别将金属纳米天线放在狭缝前方和后方,改变两者的相对位置和间距,得到光波通过狭缝的透射谱,并结合透射峰的近场,分析透射的物理机制。

2 基本原理和结构

由于金属属于色散材料,其折射率会随着光的频率或波长的变化而变化,因此采用Drude模型来表示金属的介电系数 ϵ_m 与频率的关系^[23,24]:

$$\epsilon_m = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \right], \quad (1)$$

式中 ω 为入射波频率, ϵ_0 为真空中的介电系数, ω_p 为金属的等离子体共振特征频率, γ 表示由于金属欧姆吸收损失导致的振动阻尼系数。本文中使用的金属材质为银,研究波段为600~1600 nm,相应的等离子共振频率 $\omega_p = 1.37 \times 10^{16}$ rad/s,损失系数 $\gamma = 3.21 \times 10^{13}$ rad/s。

利用3D-FDTD法模拟金属和光波的相互作用。在3D-FDTD中,吸收边界为完全匹配层(PML)。采用Yee立方网格,整个计算区域空间大小为 $N_i \times N_j \times N_k = 100 \times 100 \times 100$,网格大小为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10$ nm,时间步长为 $\tau = 16 \times 10^{-18}$ s。

考虑的结构如图1所示,在三维坐标空间中,一个长方体金属纳米天线,长为 L ,横截面为正方形,边长为 d 。天线后放置厚度为 d 的金属板,其上刻有亚波长矩形孔,长和宽分别为 L 和 d ,天线及平板的材质都为Ag。为方便描述,以狭缝中心为坐标原点定义三维坐标 xyz 如图1所示,金属平板与 $xy(z=0)$ 的平面平行,入射光波为 x 方向偏振的平面波,沿着 z 轴方向垂直入射到天线和板上。在金属板后检测透射场 E_x ,然后利用整个入射光场对其进行归一化,最后取平方得到零阶透射率。

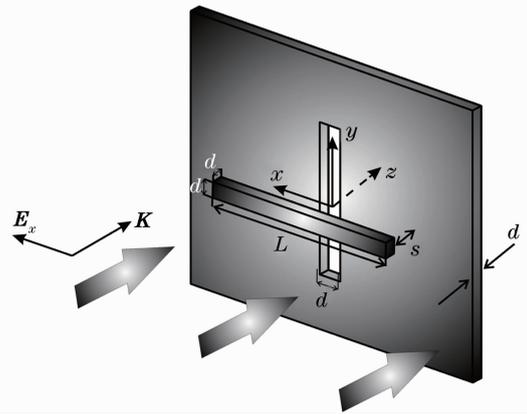


图1 天线在小孔前方时的耦合结构图
Fig.1 Schematic of the coupling structure.
Antenna lies in front of the metal film

3 模拟结果及分析

为了对比,先给出打孔金属板和金属天线单独存在时的透射情况,固定天线和孔的长 $L = 700$ nm,宽 $d = 40$ nm。天线单独存在时的衰减谱和没有天线的透射谱如图2所示。天线单独存在时,长轴沿 x 方向。可以看到在波长810 nm处出现一个明显的衰减峰,峰值达到0.35,远大于天线在 xy 平面的投影面积与整个入射区域面积的比值0.028。当只有带小孔的金属平板存在时,孔的长轴沿 y 方向。透射谱在799 nm波长处发现一微小的透射峰,透射强度约0.05,并且注意到天线单独存在时的衰减峰与小孔的透射峰波长相等。

当天线单独存在时,入射光波激起天线共振,天线的阻尼振荡将损失部分能量。天线共振将向各个方向

辐射电磁波,形成衰减峰。而当光线垂直入射到带有小孔的金属平板时会激发表面等离子体波,表面等离子体波在小孔内发生共振,将能量耦合穿过小孔形成透射峰。由于小孔单独存在时激起的表面等离子体数量有限,因此耦合隧穿到小孔后方的能量很少,导致透射强度很小。天线和小孔的几何参数一致,共振波长相同,两个峰对应波长相同。

为了增强小孔的透射,在小孔前放置金属天线,如图 1 所示。天线长轴沿 x 方向,小孔长轴沿 y 方向,两者的长轴相互垂直,中心对应,在 z 轴方向上间距为 s 。当 $s=40$ nm 时,保持天线和小孔各自的几何参数不变,得到透射谱(图 3)。出现了一个新的透射峰,波长为 944 nm,透射率为 0.15。在 780 nm 处也出现了一个透射峰,透射率为 0.015。当天线与小孔间的距离 s 增加时,944 nm 处的透射峰强度减弱并蓝移,而 780 nm 处的透射峰有少许强度增加和波长红移,在 $s=200$ nm 时,两个透射峰在 800 nm 处重叠为一个峰,透射率跟没有天线时基本相同。当 $s \geq 200$ nm 时,天线与小孔之间的耦合很弱。

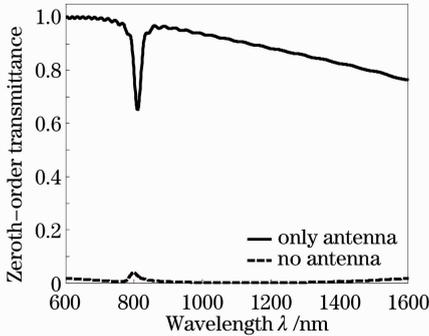


图 2 天线和小孔单独存在对入射光的影响

Fig. 2 Transmission spectra with only antenna and without antenna

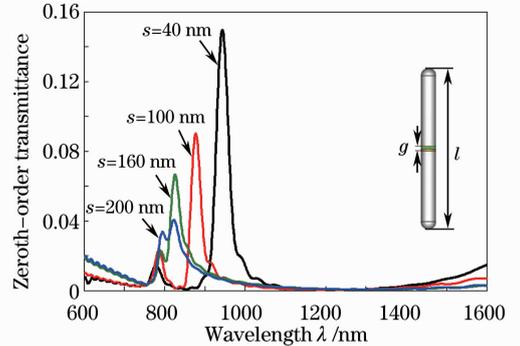


图 3 天线在金属板前对透射的影响

Fig. 3 Transmission spectra when antenna is laid in front of the hole on metal film

当 $s=40$ nm 时,出现波长分别为 944 nm 和 780 nm 的透射峰,结合近场分布分析其形成的原因。经过模拟得到如图 4 所示的近场分布情况。

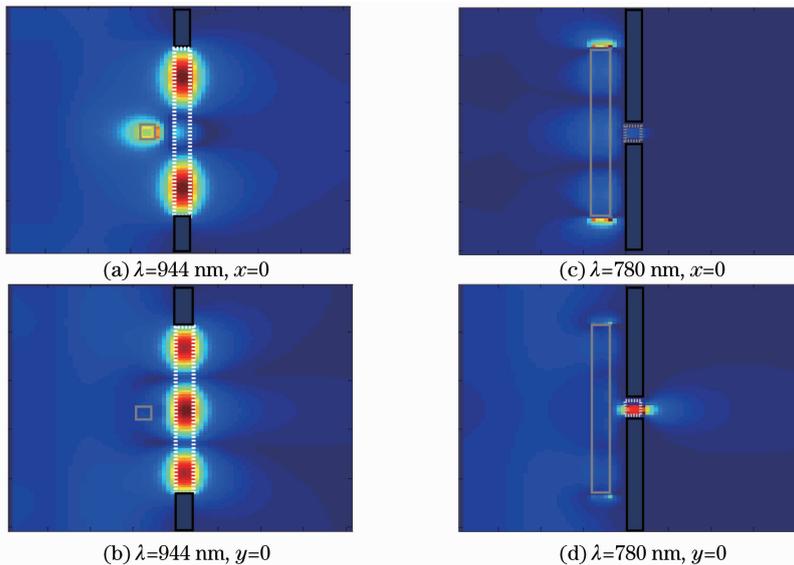


图 4 天线和小孔中的近场分布

Fig. 4 Near field distributions

波长为 944 nm 在 $x=0$ 以及 $y=0$ 截面上的近场分布分别如图 4(a),(b) 所示,图 4(c),(d) 则为波长等于 780 nm 时对应两个截面处的近场分布。图中白色实线包围区域代表金属天线,白色虚线包围区域代表小孔的位置,黑色实线包围部分为金属平板位置。从图中可以看出,波长为 780 nm 时,小孔中出现 3 个极大值,即此时为三阶共振模,而在天线上的电场比较弱,表明天线作用不明显,这说明小孔中光波的共振导致了

此透射峰;当波长为 944 nm 时,在天线和小孔中都出现很强的近场,都出现了 3 个极大值,即此时天线和小孔中都激发了三阶共振模。天线和小孔共振耦合形成了新的透射峰。此时天线形成三阶共振,将耦合远场的能量到天线周围,增强近场。天线增强的近场激发小孔附近的表面等离子体,增强小孔的近场,从而增强透射。同时,天线后带孔的金属板对天线的共振产生影响。当一个长为 l 的金属棒天线单独存在时,中间存在 g 的间隙,结构如图 3 插图所示。根据微波电路原理,此天线可以等效成由金属纳米棒的本征阻抗和间隙电容的阻抗并联组成的射频振荡电路^[14],而且其共振波长与间隙中填充的材料有关,当填充介电常数大的材料时其容抗值变大,共振波长也会变长,反之亦然。当小孔和天线结合在一起时,也形成了微波电路。带孔金属板相当于上面的间隙,其电容阻抗与天线本征阻抗并联形成新的振荡电路。当天线与小孔间的距离 s 增加时,天线的并联电容容抗减小。根据振荡电路原理,容抗减小,共振波长蓝移。

天线和小孔相对位置的变化也会对透射产生影响。分别沿着 x 轴方向平移天线和沿着 y 轴方向平移小孔,研究透射谱的变化。此时固定天线与小孔的间距 $s=40$ nm 不变,其余各项参数也保持不变。

首先,天线沿着 x 轴正方向平移距离 p ,其透射谱如图 5 所示。当 $p=50$ nm 时,相对于没有平移时出现了新的透射峰,波长为 1305 nm。当 p 增加时,此透射峰峰值增加且波长蓝移,而原来 $\lambda=944$ nm 处的透射峰减弱。当 $p=150$ nm 时,新出现的透射峰波长移至 $\lambda=1265$ nm,其对应的近场分布如图 6 所示。图 6(a)和(b)分别为天线和小孔所在的 xy 平面的近场分布。从图中可以看到天线和小孔中近场出现两个极大值,因此它们为二阶共振模。此时天线形成二阶共振,增强近场,激发小孔的二阶共振,从而增强透射。小孔的中心位置对应着天线近场的极大值。

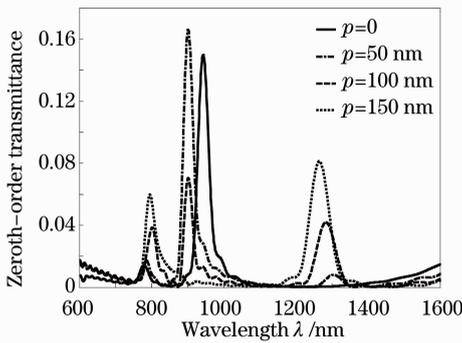


图 5 天线沿 x 轴方向平移对透射的影响

Fig. 5 Influence of antenna displacement along x direction on the transmission

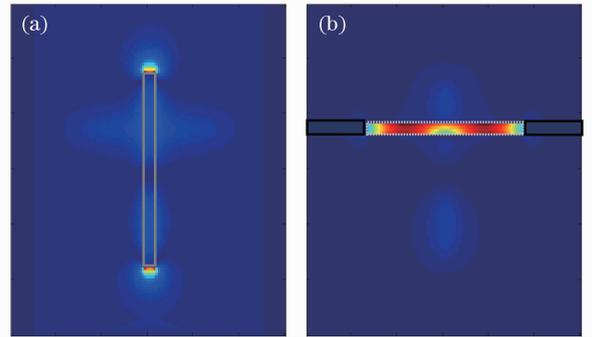


图 6 $p=150$ nm,入射光波长 $\lambda=1265$ nm 时

(a)天线平面和(b)小孔平面内的近场分布

Fig. 6 Near field distributions in (a) antenna plane and (b) hole plane when $p=150$ nm and $\lambda=1265$ nm

然后,天线不动,小孔沿着 y 轴方向移动距离 q , q 分别取 0,50,100,150 nm 时的透射谱线如图 7 所示。当 q 从 0 增加到 150 nm 时,在 1305 nm 波长段没有出现新的透射峰,而原来 $\lambda=944$ nm 的透射峰减弱。

天线和小孔相对位置变化,当沿着 x 轴方向平移天线到达一定值,天线的二阶共振极大值处正好对应小孔的位置时,能够激发小孔二阶共振,形成新的透射模。但此时天线三阶共振的极小值处对应着小孔的位置,因此不能激发小孔的共振。因此,在图 5 中当 p 增加时,天线的二阶共振能够激发小孔的二阶共振,形成新的透射模。原来 $\lambda=944$ nm 对应的小孔三阶共振随着 p 的增加其激发变弱,所以透射减小。当小孔沿着 y 轴移动时,天线二阶共振的极小值处始终对应小孔的位置,所以在图 7 中,当 q 增加时,小孔的二阶共振始终不能被激发。

天线和小孔长轴中心位置相对时,都为三阶共振,形成耦合透射模。当天线平移,二阶共振条件满足时,天线和小孔产生二阶共振形成新的透射模。

对于天线位于小孔后方时的透射也进行了研究。天线位于小孔后面,入射光波先照射到带孔的金属板上,然后透过小孔再照射到天线。小孔长轴沿 y 方向,天线长轴沿 x 方向,两者的长轴相互垂直,中心对应。

在图 8(a)中,当平板(小孔)与天线间距离 $s=40$ nm 时,出现新的透射峰,天线和小孔共振耦合形成了新的透射峰,其值远大于没有天线而小孔单独存在时的透射率。计算了峰值波长的近场,其分布与天线放置

在小孔前方的近场分布相似(文中没有给出),小孔和天线都为三阶共振。当光波入射到小孔上时,小孔共振将耦合远场的能量到小孔内,增强近场。天线共振将小孔的近场耦合成为远场,离开小孔。随着间距 s 增加,天线和小孔的并联电路的电容阻抗减小,因此透射峰减小且波长蓝移。当天线沿 y 轴平移 q 时,透射谱如图 8(b)所示,耦合透射峰的峰值减小,因为天线与小孔的耦合减弱。天线的长轴中心处对应小孔位置,所以只有它们的三阶模能够耦合,当 q 增加时,没有其他阶的耦合模出现。

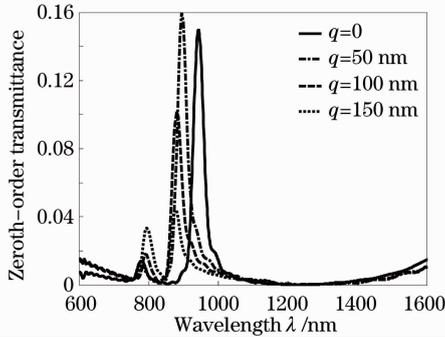


图 7 小孔沿 y 轴方向平移对透射的影响
Fig. 7 Influence of hole displacement along y direction on the transmission

4 结 论

模拟研究了三维金属亚波长纳米天线与金属板上小孔之间的耦合问题,发现纳米天线放置在小孔前方和后方都可以增强小孔的透射。天线和小孔的长轴方向垂直时,它们的共振模相互耦合,形成强透射模。天线放置在小孔前面,天线共振能够将远场耦合到近场,增强透射。天线放置在小孔后面,也可以将近场耦合到远场,增强透射。当天线共振模的阶数和小孔共振模的阶数同为二阶和三阶时,它们相位匹配,能够相互耦合,形成强透射峰。

天线与小孔的耦合可以用于表面等离子体滤波器设计;利用电压控制天线的位置,可以做成光开关。

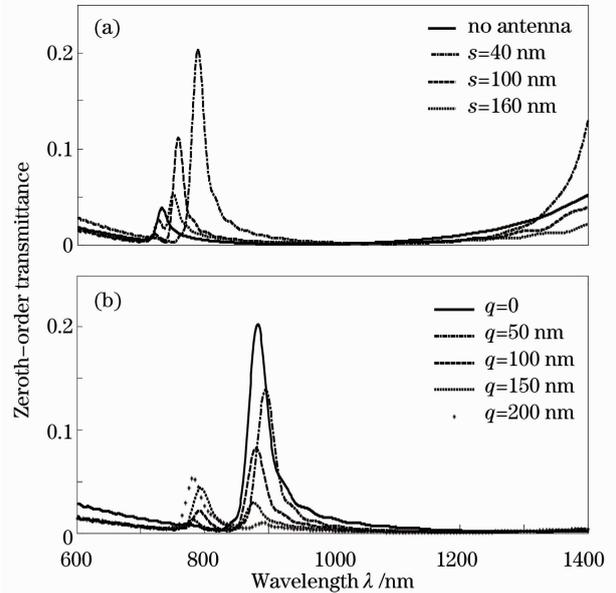


图 8 天线在小孔后面时位置对透射的影响。(a)天线和小孔间距变化;(b)天线沿 y 方向平移
Fig. 8 Influence of position on transmission when the antenna is behind the hole. (a) Distance between antenna and hole varies; (b) displacement of antenna along y direction varies

参 考 文 献

- H. A. Bethe. Theory of diffraction by small holes[J]. *Phys. Rev.*, 1944, **66**(7): 163~182
- T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- Li Juan, Wang Bingyan, Xue Wenrui. Propagation properties of Y-splitters based on MIM surface plasmonic waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0124002
李娟, 王冰艳, 薛文瑞. 基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器的传输特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0124002
- Hong Xiaogang, Xu Wendong, Zhao Chengqiang *et al.*. Design of surface plasmon resonance films structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2164~2169
洪小刚, 徐文东, 赵成强等. 表面等离子体共振膜系结构优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2164~2169
- Zhang Zhiyou, Du Jinglei, Li Min *et al.*. Optimal design of superfocusing lens configuration based on surface plasmon polariton coupling plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2524~2528
张志友, 杜惊雷, 李敏等. 基于表面等离子体激元耦合相位板超聚焦透镜结构的优化设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2524~2528
- Y. Takakura. Optical resonance in a narrow slit in a thick metallic screen [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(24): 5601~5603
- L. M. Moreno, F. J. Garcia-Vida. Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded

- by surface corrugations[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(16): 167401
- 8 F. J. Garcia-Vidal, H. J. Lezec, T. W. Ebbesen *et al.*. Multiple paths to enhance optical transmission through a single subwavelength slit[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(21): 213901
- 9 Wang Hui, Zeng Wei, Song Guofeng. Simulation and development of subwavelength periodic hole array on Au film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1638~1643
王 卉, 曾 韡, 宋国峰. 金膜上亚波长周期性孔阵的模拟与研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1638~1643
- 10 Qin Xiaojuan, Guo Yanan, Xue Wenrui. Propagation properties of a surface plasmonic waveguide with a double-square-shaped air core[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3537~3541
秦小娟, 郭亚楠, 薛文瑞. 双正方形中空表面等离子体光波导的传输特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3537~3541
- 11 S. I. Bozhevolnyi. Plasmonic Nanoguides and Circuits[M]. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2008. 7
- 12 B. Wang, G. P. Wang. Metal heterowaveguides for nanometric focusing of light[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(16): 3599~3601
- 13 B. Wang, G. P. Wang. Planar metal heterostructures for nanoplasmonic waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(1): 013114
- 14 José Dintinger, Olivier J. F. Martin. Channel and wedge plasmon modes of metallic V-grooves with finite metal thickness [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2364~2374
- 15 S. I. Bozhevolnyi, Valentyn S. Volkov, E. Devaux *et al.*. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators[J]. *Nature*, 2006, **440**(7083): 508~511
- 16 J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki *et al.*. Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(7): 475~477
- 17 J. S. Huang, T. Feichtner, P. Biagioni *et al.*. Impedance matching and emission properties of nanoantennas in an optical nanocircuit[J]. *Nano Lett.*, 2009, **9**(5): 1897~1902
- 18 K. B. Crozier, A. Sundaramurthy, G. S. Kino *et al.*. Optical antennas: resonators for local field enhancement[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **94**(7): 4632~4642
- 19 A. Alu, N. Engheta. Input impedance, nanocircuit loading, and radiation tuning of optical nanoantennas[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(4): 043901
- 20 A. Alu, M. Young, N. Engheta. Design of nanofilters for optical nanocircuits[J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **77**(11): 114107
- 21 A. Alu, N. Engheta. Tuning the scattering response of optical nanoantennas with nanocircuit loads[J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(5): 307~310
- 22 Yanxia Cui, Sailing He. Enhancing extraordinary transmission of light through a metallic nanoslit with a nanocavity antenna [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1): 16~18
- 23 F. B. Baida, D. Van Labeke. Three-dimensional structures for enhanced transmission through a metallic film: annular aperture arrays[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **67**(15): 155314
- 24 R. Müller, V. Malyarchuk, C. Lienau. Three-dimensional theory on light-induced near-field dynamics in a metal film with a periodic array of nanoholes[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(20): 205415